

浙 江 大 学

硕士学位论文文献综述

(专业学位)

文献综述题目： 关系数据可视化与可视分析综述

姓 名： xxx

学 号： Zxxxxxx

专 业： 软件工程

院 别： 软件学院

导 师： xxx

日期： 二零xx年 xx月

目 录

一、关系数据发展.....	- 1 -
二、可视化与可视分析的发展.....	- 1 -
三、关系数据的可视化.....	- 2 -
3.1 图的布局和编码.....	- 3 -
3.2 交互与导航.....	- 5 -
3.3 绘制加速.....	- 6 -
3.4 综合应用案例.....	- 8 -
参考文献.....	-10-

一、关系数据的发展

随着数据时代的到来，越来越多的关系数据被各种媒介收集而来。关系数据所描述的对象是多种多样的。例如人的社交网络，买家卖家与商品的交易网络，各种物种之间的包含关系等等。关系数据包含了我们生活中各个领域的信息。有效地分析复杂大量的关系数据，能够让我们了解生活关系构造，从而指导和调整生活中的各类关系。让数据为我所用，方便人们的生活。关系数据的发展主要分为几个领域。

首先，多元关系数据。最基础的关系型数据描述了两两元素之间的某种关系。随着数据的复杂，多元关系的出现使得分析复杂的关系网络变得越来越困难。一条关系记录中可能包含多个关系对象。同时数据集中还可能出现多种关系类型。这都为我们分析关系数据带来了麻烦。

其次，动态关系数据^[1]。随着数据采集越来越具有时效性，高效的数据采集方法能够采集到最新的关系网络数据。新的关系网络数据可以替代旧的数据作为分析对象。在动态关系数据的分析中，我们往往更加关注于网络的变化情况和网络中出现的异常等。这些信息能够帮助我们理解动态关系的发展和出现的问题。

异构关系数据^[2]。随着各个领域关系数据的不断采集。由于不同领域关心的数据属性，数据对象，数据形式各不相同，收集到的关系数据可能是异构的。他们有不同的数据表现形式（可能是文本，图片或者视频）和数据尺寸。对多源异构的关系数据进行有效地分析也是关系数据分析的难点。

二、可视化与可视分析的发展

数据的可视化与可视分析是强大的数据分析工具^[3]。随着可视化与可视分析的发展，越来越多的可视化应用出现在各类的数据分型应用领域当中。数据可视化利用视觉通道和视觉表达，把预先挖掘的数据特征和属性提取出来，进行有效直观的展现，很好的帮助用户理解大量的数据。同时，通过精心设计的交互手段，帮助用户探索并了解局部数据的详细信息。

应用可视化来处理和分析大规模的数据，优势有：

- 人类具有很强的视觉观察能力，能够很快的辨别图像中的信息，并对信息做出快速的判断和解读，在可视化的过程中，结合了计算机强大的计算能力和人类快速准确地判断解释能力，能够使得数据的分析更加高效^[4]。
- 利用图形图像进行可视化能够直观的概括大部分的数据特征，随着图像处理和图论技术的发展，形成了强大的图像处理知识基础，能够对大规模的元素进行绘制，同时对图中的特征和信息进行提取和挖掘^[5]。

- 可视化能够利用交互技术对数据进行进一步的探索,让人真正的融入到数据分析的流程中,控制并指导分析方向,做出更加高效的分析结果。

可视化与可视分析的发展过程中大致分为科学数据可视化、信息可视化及可视分析。其中**科学可视化**主要是针对自然科学学科的数据和三维真实世界的物理化学现象,进行建模、解释、处理和分析,从而在数据中找到数据模式,特征关系及异常情况。**信息可视化**主要面向抽象的高维数据,通常这些数据来源于文本、图表、软件等等。信息可视化旨在解决表达空间和信息空间的矛盾——即如何在有限的表达空间中利用数据编码和布局设计算法等展示大量的抽象高维信息。**可视分析学**则融合了数据挖掘理论、人机交互技术和计算机图形学,以数据可视化的交互界面为基础,利用有效的分析决策流程,结合人脑的辨别能力和机器计算能力,以螺旋式的信息交流与知识挖掘方法,方便用户对海量的高维动态、多源异构数据进行理解和分析。

随着可视分析的发展,循环探索式的可视分析的流程越来越流行起来,该流程一般遵循着 Scheiderman^[6]提出的“Overview first, zoom and filter, then details-on-demand”原则。即一般通常从全局的视图出发,通过查看数据的整体结构和大概的数据特征,获取全局的印象,然后决定想要探索的局部数据、特征数据或异常数据,通过交互手段过滤,缩进分析,从而形成分析流程的循环。

在数据的可视化探索中,我们经常关注于解决以下几点问题:

- 可视化的有效性:即如何通过视觉编码,直观的展示数据属性,使得用户对数据的特征一目了然。信息明确,视觉简洁,易于比较是可视化有效性的重要判断依据。
- 可视化的可探索性:设计简单、可探索的交互手段,便于用户对数据进行过滤,选择,推理等操作也是可视化的重要领域之一。交互设计中,学习成本低,不易混乱,可循环探索都是可视化可探索性的判断准则。
- 可视化的效率:随着数据量的增大,如何绘制高效的可视化界面,使得系统支持海量数据的分析成为热门研究课题。数据的可视化需要支持实时的用户交互,大量的图元绘制往往也对图像渲染带来高负载。高效的可视化渲染技术和框架是近年来可视化领域研究的重要方向。

接下来我们也将从解决这三点问题来对关系数据的可视分析做出综述。

三、关系数据的可视化

可视化在关系数据的分析中越来越扮演重要角色。例如使用节点连接图来表示关系数据。**Ball**^[7]首先使用节点链接图表示了元素之间的关系。之后人们往往使

用图（graph）的可视化方法表达关系数据。每一个节点代表一个数据对象，用节点之间的连线代表对象之间的关系。不同的颜色，形态的连线可以代表不同的关系。Palmer^[8]提出通过连线的方式来表达元素之间的关系，是最为有利的关系表达方法。通过元素之间的相似性，属性值的大小，关联和数据中的现有关系，构建节点连接关系网络，能够大大的提高数据的可读性。

基于图的关系可视化方法已被广泛的应用于社交网络分析，交易数据管理，互联网通讯分析，学术分析和生化研究等各个领域^[5]。然而随着数据量的上升，传统的可视化技术不能处理大量的关系网络，揭示网络中的数据特征，无法帮助用户探索关系模式。大量的关系数据带来了视觉混乱，操作困难和绘制效率低下等挑战。在关系数据的可视化研究中，我们往往需要研究

- 有效地可视化的布局及编码。关系网络中的数据对象往往有数千个之多，不合理的布局很容易造成视觉混乱，关系交叉遮挡等问题。Ghoniem 等人^[9]对关系布局的可读性进行了研究。研究表明，在没有精心设计的布局下，20 个节点的关系网络就可能造成可读性的严重下降。其次，关系类型的多样同样造成了视觉混乱。往往关系网络数据中都包含三个以上的数据属性，例如微博数据中，用户的年龄，性别，职业，和人际关系（家庭，同时，同学，朋友）等都是需要展示和挖掘的信息。我们需要对数据属性和不同类型的关系进行视觉编码，最常用的方法是颜色，形状以及透明度。然而，视觉编码的优劣很难评估，对应不同种类和数量的数据有哪些不同的视觉编码，如何选择编码方式使得信息能够更加有效地传递给用户仍待解决。
- 简洁的探索导航技术。在数据增长的过程中，数据对象甚至可能会超过显示像素。设计有效的导航方法，使得用户探索式的分析数据，能够解决显示尺寸不足的问题。
- 提高大图的绘制效率优化算法复杂性等问题。提高渲染效率使得可视化支持实时交互探索和高效的绘制海量关系数据。

接下来我们对这些方面一一进行介绍。

3. 1 图的布局和编码

如前所述，节点链接图最受欢迎，用于可视化数据内部的固有关系。图形的这种表示形式包括树木和更一般的网络。除节点链路布局外，最近还提出了一些新的可视化模型，如空间嵌套布局^[9]。在本章中，我们概述了与网络及其布局算法相关的数据的不同图形表示。

3. 1.1 节点链接图

节点连接图有普遍接受的基本上有普遍接受的美学规则^[10,11]，其中包括：

- 均匀分布节点和边
- 避免边和边之间的遮挡
- 布局中子结构相似
- 图形分布均匀

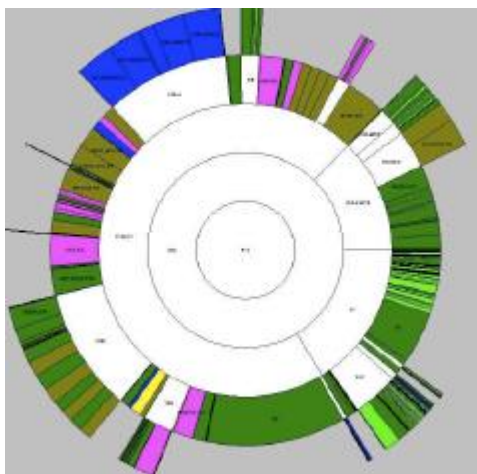
Purchase 等人^[12]提出减少交叉是最关键的审美标准。然而，大多数时候，同时满足所有规则是完全不可能的。实用的图形布局通常是美学中各种标准之间妥协的结果。关于图形布局的另一个问题是可预测性。即使用相同或相似的数据输入运行相同算法的两个不同结果也应该看起来一样或相似。

节点链接布局使用节点之间的链接来指示父子关系。Reingold 等^[13]早在 1981 年给出了节点链路布局的解决方案。然而，该算法利用屏幕空间的效率低下。Beaudoin 等人^[14]提出重叠树的分支，以集中压缩大型图数据。然而，在压缩之后，很多细节都遗漏了。S. Milgram 等^[15]通过稍微移动的分支或节点，使得它们产生紧凑的布局。由于大型数据难以处理，通常可以使用树形可视化来帮助用户了解图形结构。Munzner^[16]发现了一组特殊的图形，称为准分层图，它们非常适合转化为最小生成树。Bach 等人^[17]在社交网络的可视化中，利用节点连接图和特殊的变捆绑技术分析社交网络中的关系群组和群组之间的关系联系。

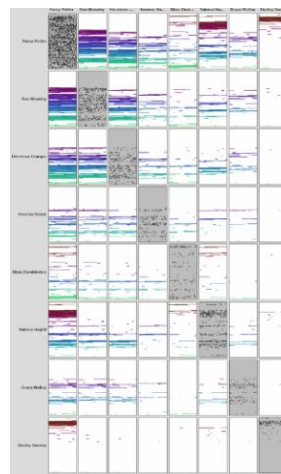
3. 1.2 空间布局

空间布局利用系统界面中的画布空间，展示不同的包含，和层次关系等。

其中，空间划分布局通过将父节点的空间划分到子节点来指示父子关系。亲子关系则邻接表示，布局使用明确的视觉编码区分父子关系和兄弟关系。一些研究人员^[18,19]认为圆形的扩散布局是一种空间分区布局，如下图 (a)，因为他没有浪费空间。但是他由于难以控制节点的大小，难以应用于大规模数据等，依然存在很多问题。



(a)



(b)

关系矩阵也是经常应用于关系数据的可视化方法之一。Oelke 等人^[20]使用了

不同的编码方式，利用数个关系矩阵来展示动态的社交关系网络及其变化。如图（b）所示，关系矩阵中，每一行和列中的元素都是一个人，人物两两之间的关系则用行与列中交叉方格中的视觉编码表示。很好的展现了关系网络随着时间的变化趋势。

3. 2. 交互

在基于图的关系数据可视化中，往往需要在狭窄的显示空间中展示大量的数据对象和他们之间的关系，可视化导航和交互就显得尤为重要。如何设计大规模图的可视化交互，使得用户能够简单，方便的浏览自己想要得到的信息，完成关系数据的探索，是一个具有挑战的问题。

交互和导航在计算机信息可视化中至关重要，可以帮助用户发掘大图中的一些细节。Yi 等人^[21]给出了一个通用的交互技术的总结，基于它们的目的，可以分成七组：

- 选择：帮助用户高亮特定目标，或者让计算机去处理一些特定的项目
- 探索：它用于将当前视图点跟改为相同布局表示中的另一部分数据，比如平移和旋转
- 再配置：用于在相同表示方案（矩阵形式、节点链接形式等）的不同布局（力引导布局、树状布局等）之间进行切换，比如替换图中的节点，以及根据不同的标准重新排列数据
- 编码：它用于切换不同的表示方案，例如将布局从节点链接形式更改为轮廓表示
- 抽象/具象：它调整数据表示的抽象级别，为用户提供对数据的不同见解，例如缩放和聚类
- 过滤：它可以减少显示的数据量，并根据用户的要求使剩余的内容更具可读性
- 连接：它用于突出显示与焦点相关的内容，或者内容之间的连接。

对于放缩，用户必须在不同的缩放级别下，用户还需要调整自己的认知，以便在不同的缩放级别下识别同一个项目。Furans 和 Bederson^[22]提出了空间尺度图来解决这个问题。他们通过堆叠不同放大级别的原始二维表示的副本，来构造一个抽象空间，于是各种缩放和平移操作，可以描述为这个堆叠空间中的路径。例如，平移的交互操作指的是相同层中的路径，而缩放操作则是从一个层到另一个层的路径。

过滤是指从视图中隐藏或强调部分内容。Ahlberg 等人^[23]提出了视觉信息搜索的动态查询过滤器。查询参数可以通过滑块，按钮等快速调整。LensBar^[24]提供

了另一种简化过滤过程的思路。浏览和查询的操作都集成在 **LensBar** 中变成一个简单的滚动滑块，用户可以通过关键词过滤来控制显示的数据量。

在展示方面，**Sarkar** 和 **Brown** ^[25]提出了鱼眼视图相关可视化中高度引用的作品之一。通过比较扭曲的地图和正常的美国城市地图，他们成功地展示了鱼眼视图相对于正常视图的优势以及它们是如何可被理解的。**TA Keahey** 扩展和推广了鱼眼技术^[26]。这种拓展不仅仅提供了不同级别进行失真的手段（例如，替换掉带有图标的节点）还构建了对应的未失真图像的其他版本的图像（例如，为鱼眼扭曲提供附加的颜色描述）。甘斯纳等人^[27]提出了另一种大规模图的拓扑鱼眼的方法。他们的鱼眼显示了一个焦点，其周围具有完整的详细网络，离焦点越来越远的节点，分辨率越来越粗糙。

与其他基于纸张的可视化技术相比，动画是计算机信息可视化技术的独特优势。动画最重要的功能就是帮助用户了解数据集，因为它隐含地将时间作为额外的维度来帮助挖掘数据。**Robertson** ^[28]认为，动画可以帮助用户减少思考，因为它将部分认知任务转移到人类的视觉系统。与不同视图之间直接转换相比，动画转换可以更好地提供关于数据关系的线索，并帮助用户关联系统的两个状态。一些研究人员已经表明，动画可以提高用户的主题满意度。因此，它在许多作品中越来越受欢迎，以帮助用户保持数据可视化方向。**Kadaba** 等^[29]使用静态表示和动画表示进行不同探索之间的比较。他们应用 **Michotte** 的放大规则，这表明更容易察觉移动物体何时撞击另一个物体并将其置于运动状态，以便可视化因果关系。他们认为动画通常可以促进对复杂数据的理解。

3. 3 绘制加速

图的渲染效率在可视化的过程中有很高的要求，因为要提供可交互的可视化系统，要求大尺寸的图可视化界面能够在短时间内完成渲染绘制。因为很多的图形渲染算法都是 **NP** 问题，当面对海量数据是，有些只能够应用在简单数据集上的复杂算法就不能使用。即使能够使用，很长的渲染时间也会使得可视化系统变得交互困难，用户体验下降。

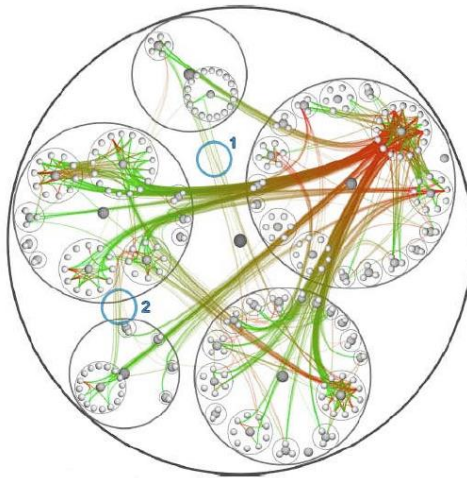
试图进行绘制加速的方法，和减少视觉混乱的方法相类似，研究人员做了很多不同的尝试来解决这个问题。接下来我们通过节点的聚类 and 采样这两个方面进行介绍。

3. 3. 1 节点聚类

节点的聚类是关系网络绘制加速中常用的手段，他根据节点的属性和信息，相对之间的相关性，把节点分组，分类或进行聚合，如下图。然后把整个网络中

的节点，划分到不同的集群当中，并将这些子图画为单个节点或小区域。这种方法能够的另一个好处在于，图形的抽象同时有助于强调全局的拓扑结构，增强大规模图数据的可读性。这类工作的主要研究点在于研究如何定义数据对象之间的相似性。

Wattenberg 等人^[30]描述了一种聚合网络中节点的方法。他计算对象的属性值，然后计算两两之间的差值进行相似性的比较。这种方法仅限于规整的数据集。此外，更多的聚类方法则是应用关系数据中的关系本身和层次结构来进行聚类，如连通性，簇大小，几何接近度和统计变化^[31,32,33]等等。Auber 等人^[34]提出了一种基于集群半径，连通性和相互之间度的多少的聚类方法，实现了基于图形结构的聚类。



在图像聚类的时候，聚类的时间复杂度是绘制效率另一个挑战。Kernighan 和 Lin^[35]提出了一种启发式的聚类算法来提高聚类算法的时间复杂度。但是可拓展性很差。Newman^[36]之后提出了一种用于检测网络中集群的快速聚类算法，使得算法的时间复杂度达到了 $O((m+n)n)$

3.3.1 数据采样

数据的采样也是增加绘制效率的好方法，Krishnamurthy 等^[37]提出通过数据的合理采样，数据的拓扑结构，分布状况都可以进行保留，而需要绘制的对象则仅仅需要 30%。在数据采样中，随机抽样是最长采用的方法。Rafiei 和 Curial 等人^[38]研究了不同的采样方案在采样后结果的优劣情况，并表明在大多数情况下，图形结构都能得以保留。同时提供了人参与采样调参的交互手段，改进采样结果。为了判断采样的好坏，Cui 等^[39]提出了评估采样的两个方法：直方图差异测量和最近邻测量。帮助用户了解采样优劣。而 Leskovec 和 Faloutsos 等人^[40]则比较了现有的采样算法。根据对原始图像的特征保留和现有图像的大小对已有的算法进行了详细的评估。

3. 4. 综合应用案例

关系网络的可视化系统在各个领域中都有广泛的应用。例如社交网络，交流系统和学术关系等等。本章节接下来的部分中，我们将针对这三个典型领域，介绍基于图的关系可视分析系统应用，解释在真实的应用场景下，如何利用可视化技术，有效地提取数据特征和信息，并直观的展现给用户。

3. 4. 1 社交网络

社交网络是高聚合性的关系网络^[41]，它具有高联系性和小的网络半径的特点。社交网络领域中，六度关系网络理论广为人知，即 **Milgram**^[42]进行的实验表明，任何两个人至多距离 6 步。即通过 6 个朋友就可以认识。所以说社交网络通常会呈现关系复杂，密集且成群出现的特点，故识别社交网络中的群组，分析人物角色社交网络分析的主要任务。而识别连接各个社交关系小组的关键性连接人物，即社交网络中的关键中心节点，也是该领域应用的主要方向。

社交网络的分析应用领用主要应用两种可视化布局，节点连接图和矩阵布局。其中，节点连接图用于展示整体的网络拓扑结构，而矩阵布局则用于研究局部数据的特征属性。**Vister** 等人^[43]利用电子邮件数据和微博数据，分析在线人际关系的变化情况。它使用节点链接图，提供用户在可视化界面中进行过滤，搜索和使用不同布局方法的交互技术，帮助用户理解社交网络中隐藏的关系，群组之间隐蔽的链接，同时通过平移放缩等导航技术，帮助用户浏览分析结果。

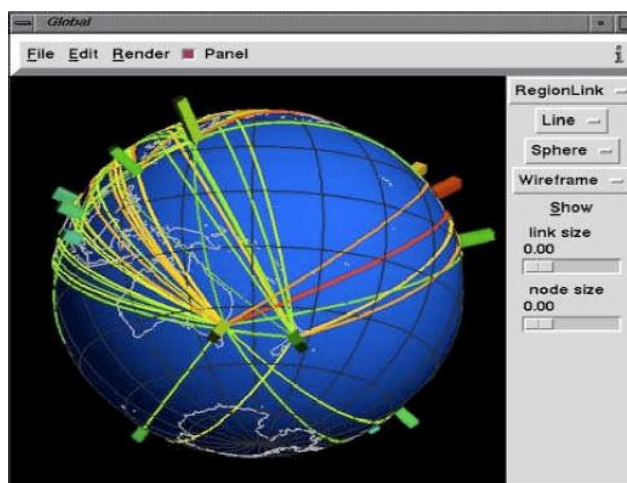
社交网络也是典型的多变量图，这意味着探索如何节点的属性影响链接模式是非常重要的。而 **OntoVis**^[44]和 **PivotGraph**^[45]系统则探索了关系数据中，数据对象属性对于关系类型之间的影响模式。他们都通过对相似对象进行分组聚类的方法，分析不同组别的对象中可能存在的不同关系类别。例如“种族是如何影响人们的沟通方式的”。系统采用用户利于理解的语意抽象模型，采用不遮挡的布局方法，聚合展示不同群组，在交互时给予细节展示，很好的完成了从全局到局部的社交关系分析目标。

3. 4. 2 通信网络及互联网管理

电信通信网络和互联网的管理，也是图可视化的重要应用领域之一。通讯网络的管理中，节点的位置应该被保留，从而能够更好的与现实中的位置相结合，进行网络管理。而对网络中关系的可视化，则是这类应用想主要解决的主要问题。

Donna Cox 等人^[46,47,48]利用节点连接图和地图的融合，如下图，直观的展现了在地理空间中，各个网络节点之间的联系。利用不同颜色，宽度的线条展示不

同类型和联系的关系。**Becker** 等人^[49]提出了一种可交互的通讯网络管理系统，处理了 **AT&T** 公司一百余台数据交换机之间的流量通讯记录。他能够减少在分析初期可视化界面中的视觉混乱，通过聚焦，过滤和动画，展现复杂的网络结构和结构之间的变化。**SeeNet3D**^[50]系统则把电信网络的管理应用到 3D 空间当中，生动形象的展示了全球互联网的通讯网路。



3. 4. 3 学术关系网络

在学术领域,学科内的学术交流和跨学科的学术合作是各个研究领域的关键。学术论文的相互引用构成了论文之间的引用网络,同时也构成了学者之间合作及交流的学术网。它通常有很高的群组特性,加纳等人^[51]提出了利用图论的方法表示网络,找出引用网络并给与展示。**NetLens** 等人^[52]使用直方图和列表的方法展现引文网络的概览,并提供有关对象的详细属性操作勇于探索。之后,**Hummon** 和 **Doreian** 分别提出了计算网络中关系权重的方法,从而找到引用网络中的关键路径,而 **Batagelj** 则把这种方法应用到了数千个节点的大型引用网络^[53,54,55]。而 **Lu** 等人^[56]则把节点的相似性方法应用到引文网络当中,来寻找相似引文的工作。他们认为引文的相似性能够反映工作的相似性。**Shneiderman** 和 **Aris**^[57]则发明了一种基于语义的网络可视化方法。针对联邦司法案件的引用网络,他们通过为用户提供交互式的语义过滤器,便于用户执行他们的探索任务。

参考文献

- [1] Ellson, John, et al. "Graphviz and dynagraph—static and dynamic graph drawing tools." *Graph drawing software* (2004): 127-148.
- [2] Chamberlin, Don, Jonathan Robie, and Daniela Florescu. "Quilt: An XML query language for heterogeneous data sources." *International Workshop on the World Wide Web and Databases*. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [3] 陈为, 沈则潜, and 陶煜波. "数据可视化." *电子工业出版社 2013 年版*(2013).
- [4] Zhang, Jiajie. "The interaction of internal and external representations in a problem solving task." *Proceedings of the thirteenth annual conference of cognitive science society*. Vol. 88. Erlbaum Hillsdale, NJ, 1991.
- [5] Cui, Weiwei, and Huamin Qu. "A survey on graph visualization." *PhD Qualifying Exam (PQE) Report, Computer Science Department, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong* (2007).
- [6] Shneiderman, Ben. "The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations." *Visual Languages, 1996. Proceedings., IEEE Symposium on*. IEEE, 1996.
- [7] Ball, Walter William Rouse. *Mathematical recreations and essays*. MacMillan, 1914.
- [8] Palmer, Stephen, and Irvin Rock. "Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness." *Psychonomic bulletin & review* 1.1 (1994): 29-55.
- [9] Ghoniem, Mohammad, Jean-Daniel Fekete, and Philippe Castagliola. "On the readability of graphs using node-link and matrix-based representations: a controlled experiment and statistical analysis." *Information Visualization* 4.2 (2005): 114-135.
- [10] Johnson, Brian, and Ben Shneiderman. "Tree-maps: A space-filling approach to the visualization of hierarchical information structures." *Proceedings of the 2nd conference on Visualization'91*. IEEE Computer Society Press, 1991.
- [11] Purchase, Helen. "Which aesthetic has the greatest effect on human understanding?." *International Symposium on Graph Drawing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [12] Purchase, Helen C., Robert F. Cohen, and Murray James. "Validating graph drawing aesthetics." *International Symposium on Graph Drawing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [13] Reingold, Edward M., and John S. Tilford. "Tidier drawings of trees." *IEEE Transactions on Software Engineering* 2 (1981): 223-228.
- [14] L. Beaudoin, M.A. Parent, and L.C. Vroomen. Cheops: A compact explorer for complex hierarchies. *Proceedings of the IEEE Conference on Visualization*, 1996.
- [15] S. Milgram. The small world problem. *Psychology Today*, 2(1):60–67, 1967.
- [16] T. Munzner. H3: laying out large directed graphs in 3D hyperbolic space. *Information Visualization, 1997. Proceedings., IEEE Symposium on*, pages 2–10, 1997.
- [17] Bach, Benjamin, et al. "Towards unambiguous edge bundling: Investigating confluent drawings for network visualization." *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 23.1 (2017): 541-550.
- [18] K. Andrews and H. Heidegger. Information slices: Visualising and exploring large hierarchies using cascading, semi-circular discs. *Proc of IEEE Infovis' 98 late breaking Hot Topics*, pages 9–11, 1998.
- [19] J. Stasko and E. Zhang. Focus+Context Display and Navigation Techniques for Enhancing Radial, Space-Filling Hierarchy Visualizations. *Proceedings of the IEEE Symposium on*

- Information Visualization, page 57, 2000.
- [20] Oelke, Daniela, Dimitrios Kokkinakis, and Daniel A. Keim. "Fingerprint Matrices: Uncovering the dynamics of social networks in prose literature." *Computer Graphics Forum*. Vol. 32. No. 3pt4. Blackwell Publishing Ltd, 2013.
 - [21] John T. Stasko Ji Soo Yi, Youn ah Kang and Julie A. Jacko. Toward a Deeper Understanding of the Role of Interaction in Information Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6):1224–1231, 2007.
 - [22] G.W. Furnas and B.B. Bederson. Space-scale diagrams: understanding multiscale interfaces. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 234–241, 1995.
 - [23] C. Ahlberg and B. Shneiderman. Visual information seeking: tight coupling of dynamic query filters with starfield displays. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1994.
 - [24] T. Masui. LensBar-Visualization for Browsing and Filtering Large Lists of Data. *Proceedings of InfoVis*, 98:113–120, 1998.
 - [25] M. Sarkar, M.H. Brown, P. Bauersfeld, J. Bennett, and G. Lynch. Graphical Fisheye Views of Graphs. *Human Factors*, pages 83–91, 1992.
 - [26] TA Keahey. The generalized detail in-context problem. *Information Visualization*, 1998. *Proceedings. IEEE Symposium on*, pages 44–51, 1998.
 - [27] E.R. Gansner, Y. Koren, and SC North. Topological fisheye views for visualizing large graphs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(4):457–468, 2005.
 - [28] G.G. Robertson, J.D. Mackinlay, and S.K. Card. Cone Trees: animated 3D visualizations of hierarchical information. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology*, pages 189–194, 1991.
 - [29] Pourang P. Irani Nivedita R. Kadaba and Jason Leboe. Visualizing causal semantics using animations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007.
 - [30] M. Wattenberg. Visual exploration of multivariate graphs. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, pages 811–819, 2006.
 - [31] FJ Newbery. Edge concentration: a method for clustering directed graphs. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Software configuration management*, pages 76–85, 1989.
 - [32] R. Sablowski and A. Frick. Automatic graph clustering. *Proc. of 4th Symposium on Graph Drawing (GD'96)*, pages 395–400.
 - [33] K. Sugiyama and K. Misue. Visualization of structural information: automatic drawing of compound digraphs. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 21(4):876–892, 1991.
 - [34] D. Auber, Y. Chiricota, Multiscale visualization of small world networks. *Proc. IEEE Symposium on Information Visualization*, pages 75–81, 2003.
 - [35] B.W. Kernighan and S. Lin. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *Bell System Technical Journal*, 49(2): 291 – 307, 1970
 - [36] MEJ Newman. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review E*, 69(6):66133, 2004.
 - [37] V. Krishnamurthy, M. Faloutsos, M. Chrobak, L. Lao, JH Cui, and AG Percus. Reducing Large Internet Topologies for Faster Simulations. *IFIP Networking*, 2005.
 - [38] D. Rafiei and S. Curial. Effectively Visualizing Large Networks Through Sampling. *Visualization, IEEE 2005*, pages 48–48, 2005.

- [39] Q. Cui, M. Ward, E. Rundensteiner, and J. Yang. Measuring Data Abstraction Quality in Multiresolution Visualizations. *IEEE TVCG*, 12(5):709–716, 2006.
- [40] J. Leskovec and C. Faloutsos. Sampling from large graphs. *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and Data mining*, pages 631–636, 2006.
- [41] DJ Watts and SH Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684):409–10, 1998.
- [42] S. Milgram. The small world problem. *Psychology Today*, 2(1):60–67, 1967.
- [43] J. Heer and D. Boyd. Vizster: Visualizing Online Social Networks. *InfoVis 2005 IEEE Symposium on Information Visualization*, 2005.
- [44] Z. Shen, K.L. Ma, and T. Eliassi-Rad. Visual Analysis of Large Heterogeneous Social Networks by Semantic and Structural Abstraction. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 12(6):1427–1439, 2006.
- [45] M. Wattenberg. Visual exploration of multivariate graphs. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, pages 811–819, 2006.
- [46] D. Cox and R. Patterson. Visualization Study of the NSFNET. Retrieved June, 2003.
- [47] KC Cox and SG Eick. Case study: 3D displays of Internet traffic. *Information Visualization, 1995. Proceedings.*, pages 129–131, 1995.
- [48] K.C. Cox, S.G. Eick, and T. He. 3D geographic network displays. *ACM SIGMOD Record*, 25(4):50–54, 1996.
- [49] R.A. Becker, S.G. Eick, and A.R. Wilks. Visualizing network Data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(1):16–28, 1995.
- [50] K.C. Cox, S.G. Eick, and T. He. 3D geographic network displays. *ACM SIGMOD Record*, 25(4):50–54, 1996.
- [51] R. Garner. Computer-oriented graph theoretic analysis of citation index structures. 2004.
- [52] H. Kang, C. Plaisant, B. Lee, and B.B. Bederson. NetLens: iterative exploration of content-actor network data. *Information Visualization*, 6(1):18–31, 2007.
- [53] N.P. Hummon and P. Doreian. Connectivity in a citation network: The development of DNA theory. *Social Networks*, 11(1):39–63, 1989.
- [54] NP Hummon and P. Doreian. Computational Methods for Social Network Analysis. *Social Networks*, 12:273–288, 1990.
- [55] N.P. Hummon, P. Doreian, and L.C. Freeman. Analyzing the Structure of the Centrality-Productivity Literature Created Between 1948 and 1979. *Science Communication*, 11(4):459, 1990.
- [56] W. Lu, J. Janssen, E. Milios, N. Japkowicz, and Y. Zhang. Node similarity in the citation graph. *Knowledge and Information Systems*, 11(1):105–129, 2007.
- [57] B. Shneiderman and A. Aris. Network Visualization by Semantic Substrates. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(5), 2006.